第 41 卷 第 6 期
2024 年 12 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 41 No. 6
Dec. 2024

文章编号:1000-4939(2024)06-1378-07

外附轻质墙板的弱轴全螺栓装配式钢框架试验研究

韦俊[1],樊敏[2],王洪臣[3],郭宏超[2],李慎[2],王振山[2]

(1. 苏州科技大学土木工程学院,215011 苏州;2. 西安理工大学土木建筑工程学院,710048 西安;
3. 中国建筑西北设计研究院有限公司,710018 西安)

摘 要: 为实现钢框架 H 型钢柱的弱轴连接,设计了一种悬臂段 H 型钢梁柱的弱轴顶底 L 型件连接钢框架,并将保温装饰轻质墙板作为围护结构外挂于钢框架。对 1 榀单层单跨 1∶2缩尺试件进行抗震试验研究,分析结构体系的整体破坏模式、承载力、刚度以及耗能能力的变化,评价外挂轻质墙板体系的整体性能。结果表明:外挂轻质墙板全螺栓装配式弱轴连接钢框架的破坏模式合理,墙板体系稳定,L 型件连接节点实现了梁端塑性铰外移。结构滞回曲线饱满,骨架曲线呈 S 型,正向屈服位移与极限承载力分别为 27.08 mm 与 351.99 kN,负向为 19.78 mm 和 377.43 kN,满足结构延性与承载力需求;试件塑性刚度退化缓慢,最大阻尼比达 0.35,整体耗能性能较好。外挂墙板的干挂形式与钢框架的全螺栓连接方法共同提高了建筑装配化效率。

关键词: 钢框架;弱轴连接;轻质墙板;循环加载;抗震性能

中图分类号: TM561.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.018

Experimental research on weak shafted fully bolted steel frame with lightweight wall panels

WEI Jun[1], FAN Min[2], WANG Hongchen[3], GUO Hongchao[2], LI Shen[2], WANG Zhenshan[2]

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, 215011 Suzhou, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China;
3. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., 710018 Xi'an, China)

Abstract: In order to realize the weak axis connection of the H-shaped steel column of the steel frame, designs a cantilever section H-shaped steel beam-column weak-axis top and bottom L-shaped parts to connect the steel frame, and the thermal insulation decorative lightweight wallboard is used as the enclosure structure to hang on the steel frame. The seismic test was carried out on one-bay, one-story and 1∶2 scaled specimens, and the overall failure mode, bearing capacity, stiffness and energy dissipation capacity of the structural system were analyzed, the overall performance of the externally mounted lightweight wallboard system was evaluated. The results show that the failure mode of the fully bolted weak axis connection steel frame of the external lightweight wall panel is reasonable, the wall panel system is stable, and the L-shaped connection node realizes the outward movement of the plastic hinge of the beam end. The hysteresis curve

收稿日期: 2021-05-11 **修回日期:** 2022-06-17
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51978571);陕西省杰出青年基金资助项目(No. 2021JC-41);陕西省重点研发计划资助项目(No. 2022SF-199;2022SF-121)
通信作者: 郭宏超。E-mail:ghc-1209@163.com
引用格式: 韦俊,樊敏,王洪臣,等. 外附轻质墙板的弱轴全螺栓装配式钢框架试验研究[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1378-1384.
WEI Jun, FAN Min, WANG Hongchen, et al. Experimental research on weak shafted fully bolted steel frame with lightweight wall panels[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(6):1378-1384.

of the structure is full, and the skeleton curve is S shaped. The positive yield displacement and ultimate bearing capacity are 27.08 mm and 351.99 kN, respectively, and the negative direction is 19.78 mm and 377.43 kN, which meet the requirements of structural ductility and bearing capacity. The plastic stiffness of the specimen degrades slowly, the maximum damping ratio reaches 0.35, and the overall energy dissipation performance is better. The dry-hanging form of the external wall panel and the full-bolt connection method of the steel frame together improve the efficiency of building assembly.

Key words: steel frame; weak shaft connection; lightweight wall panel; cyclic loading; seismic performance

传统建筑施工周期长、工程造价高、施工组织管理程序复杂、环境污染严重[1]。针对传统建筑的不可持续性,装配式建筑由于构件在工厂预制,现场进行安装,注重建筑标准化、模块化,大幅提升了施工效率[2-3]。钢结构具有建设轻量化、绿色环保、材料可回收利用等优势,成为现阶段装配式建筑的主要应用形式[4-5]。钢结构建筑中梁柱的焊接连接易形成焊缝处应力集中,强震下发生脆性破坏[6]。为避免全焊节点的脆性破坏,有学者研究了栓焊节点,利用焊接连接的刚度与螺栓连接的变形性能,有效避免节点在强震作用下的破坏[7-8]。基于栓焊节点中螺栓连接带来的节点延性的提升,刘学春等[9]研究了一种模块化装配式多高层钢结构全螺栓梁柱节点,结果表明,全螺栓连接节点的屈服机制属于半刚性范围,可有效改善节点的延性不足问题,满足强震下结构的塑性变形。

框架结构是钢结构建筑中的主要结构形式,将全螺栓连接形式应用至钢框架结构,可快速实现梁柱的装配,且运输与施工便捷。何明胜等[10]采用方钢管柱与 H 型钢梁进行了全螺栓框架结构试验研究,结果表明,相对于栓焊连接方式,全螺栓连接钢框架的承载力、延性和耗能能力均有所提高。WANG 等[11]基于钢框架的延性提升,设计了一种全螺栓可更换耗能元件钢框架结构,并进行了试验研究。结果表明,全螺栓连接提升了结构的延性,且可更换耗能元件保证了震后建筑使用功能的快速恢复。中高层建筑中钢柱强弱轴均参与受力,梁柱节点包括强轴与弱轴连接。其中,H 型钢柱的弱轴刚度相对较弱,与型钢梁连接方式将影响结构的整体抗侧性能。李峰宇等[12]对弱轴全螺栓连接钢框架的外伸端板梁柱节点进行了滞回试验研究,梁端外伸端板直接与 H 型钢柱腹板进行螺栓连接,结果表明结构具有良好的抗震性能与抗连续倒塌能力,但此种连接方式削弱了 H 型钢柱的腹板强度,不利于结构塑性铰外移,与“强节点弱构件”设计理念相悖。XU 等[13]设计了钢框架 H 型钢梁柱弱轴连接形式,通过试验研究了连接的刚度、强度和耗能能力,弱轴方向梁通过连接板仅与柱翼缘连接,使得连接强度有所不足。YIN 等[14]对 H 型钢梁柱弱轴连接节点进行研究,节点通过悬臂段将 H 型钢梁与 H 型钢柱翼缘进行加强连接,结果表明这种连接方式很好地提升了节点的承载力,这对弱轴连接钢框架带来新的启发。

围护结构是建筑的主要组成部分,将墙板体系与钢框架结合,可进一步提高建筑装配性能。SUN 等[15-16]将再生混凝土墙板作为抗侧力构件,应用于钢框架结构中,提升了结构的延性与耗能能力,且实现了再生粗骨料的有效利用。郭宏超[17]研究了一种钢板剪力墙半刚性钢框架结构,结果表明半刚性钢框架满足延性需求,钢板剪力墙提升了结构的承载力。王静峰等[18]对轻钢龙骨注浆复合墙板-钢框架结构的抗震性能进行了试验研究,结果表明带龙骨的注浆符合墙板可实现与钢框架的快速装配,且兼顾墙体的保温性能。ZHOU 等[19]提出一种纤维轻质水泥板复合墙板,并将其外挂于钢框架,研究了结构的整体抗震性能,结果表明外挂轻质墙板可提高钢框架结构的装配效率获得的抗震性能。

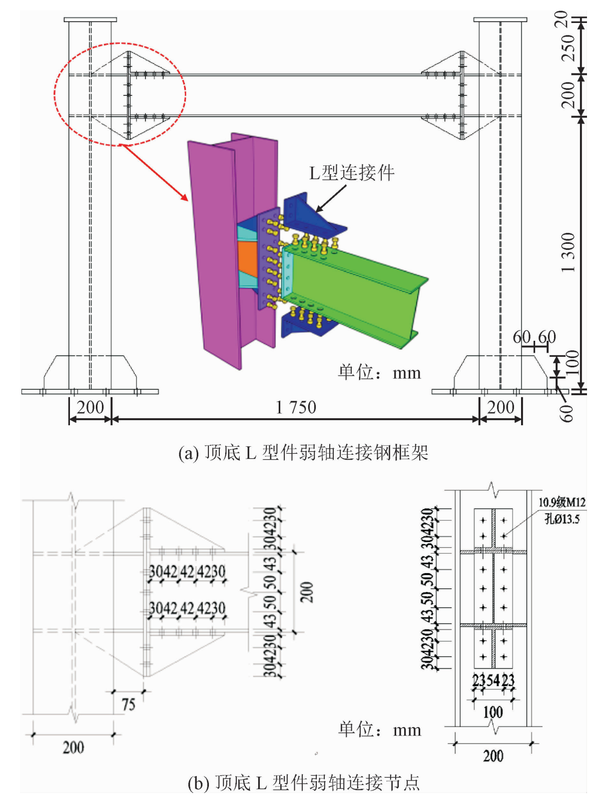
基于轻质墙板与螺栓连接钢框架的已有研究,本研究提出了外挂轻质保温装饰墙板的全螺栓装配式弱轴连接钢框架结构。外挂保温装饰轻质墙板通过连接件干挂于钢框架上,兼顾墙体保温装饰性能,提升了建筑装配化效率。

1　试验概况

1.1　试件设计

试验钢框架原型结构依托于国家电网某变电站全螺栓装配式钢框架,其抗震设防烈度为 8 度,二类场地。根据原型结构选取 1 榀单层单跨弱轴连接框架,进行 1∶2缩尺试验。框架通过龙骨外挂保温装饰一体化墙板。框架连接节点通过顶底 L 型件与悬

臂段连接。框架跨度为 1 950 mm,高度为 1 400 mm;保温装饰一体化墙板由墙板厂家提供,宽度和高度分别为 590 mm 和 640 mm,两侧面板采用无石棉纤维增强硅酸钙板,中间具有保温岩棉夹层,总厚度为 112 mm。墙板与框架通过龙骨以及连接件进行连接,龙骨采用 Q235 材质镀锌薄壁方钢管,截面尺寸为□40 mm×2.0 mm,长度为 1 750 mm 焊接于钢框架翼缘上,竖向间距为 640 mm,并布置两道竖向龙骨增加整体刚度。试件几何尺寸和节点够构造详图分别见图 1;外挂墙板示意图见图 2。



(a) 顶底 L 型件弱轴连接钢框架

(b) 顶底 L 型件弱轴连接节点

图 1　试件构造及几何尺寸

Fig. 1　Specimen construction and geometric dimensions

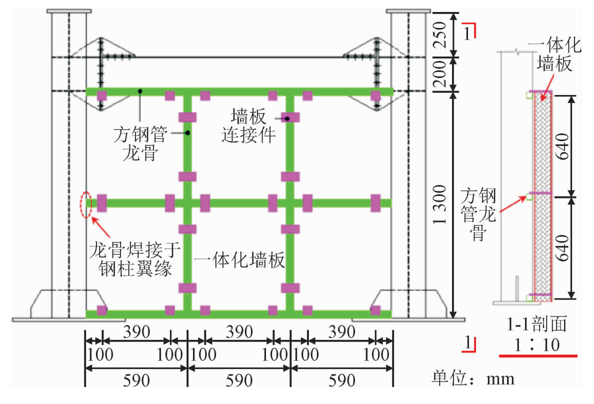


图 2　保温装饰墙板整体布置

Fig. 2　The overall arrangement of thermal insulation decorative wall panels

1.2　材性试验

试件梁柱以及连接件均采用 Q355B 钢材,包括 5 种厚度板材,根据《金属材料拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2011)[20] 规定进行材性拉伸试验。板材实际厚度 t,屈服强度 f_y,极限抗拉强度 f_u,弹性模量 E 与断后伸长率 δ 参数见表 1。

表 1　材性试验参数

Tab. 1　Material test parameters

取样位置	t/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E/GPa	伸长率 δ/%
板件	8.0	358.22	518.26	201.00	24.10
梁翼缘	8.0	348.46	497.16	197.00	33.58
梁腹板	5.5	389.16	507.19	178.00	31.97
柱翼缘	12.0	349.15	507.66	202.00	29.01
柱腹板	8.0	387.83	566.14	185.00	32.26

1.3　试验装置与加载制度

试验采用建研式反力架-平行四连杆加载试验系统进行加载,系统具有侧向支撑,能够保证试件沿水平作动器方向移动。竖向荷载由 2 500 kN 液压千斤顶经过分配梁施加,水平方向由 1 000 kN 作动器进行低周反复加载,加载装置示意见图 3。试验数据采集使用 DH3820N 分布式信号测试分析系统,通过定向采集频率 1 Hz,自动采集存储于计算机中。

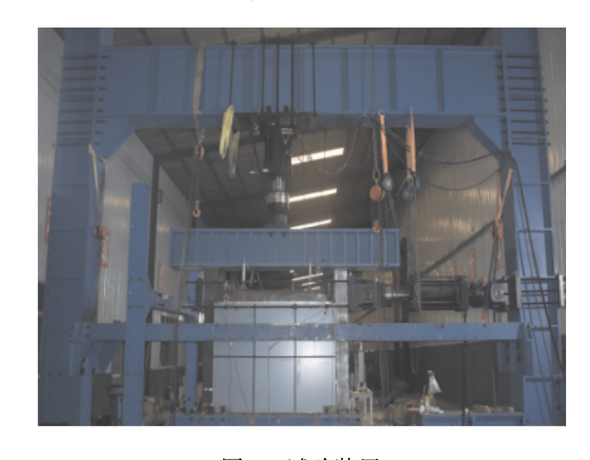

图 3　试验装置

Fig. 3　Test setup

根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—2015)[21],为模拟实际结构传递给柱的竖向轴压力,取轴压比 0.2 施加柱顶竖向荷载。水平加载采用力-位移联合控制,试件以荷载-位移曲线出现明显

转折点为屈服标志。屈服前以力控制加载,每级循环 1 次,荷载增量取 50 kN;试件屈服后,按实际屈服位移 δ_y 控制加载,每级循环 3 次,每级增量为 0.5δ_y,直至试件承载力下降至峰值荷载的 85% 或试件破坏无法加载,停止试验加载。

1.4　测点布置

测量试件关键部位的位移,见图 4 所示。梁中心设置水平外位移计 DT1,测量试件水平层间位移;梁端属性铰形成位置设置竖向位移计 DT2 ~ DT5,测量梁端竖向位移;节点域沿对角线布置位移计 DT6、DT7 测量节点转角位移;柱脚与地梁布置百分表 D1、D2,测量柱脚与地梁滑移量。

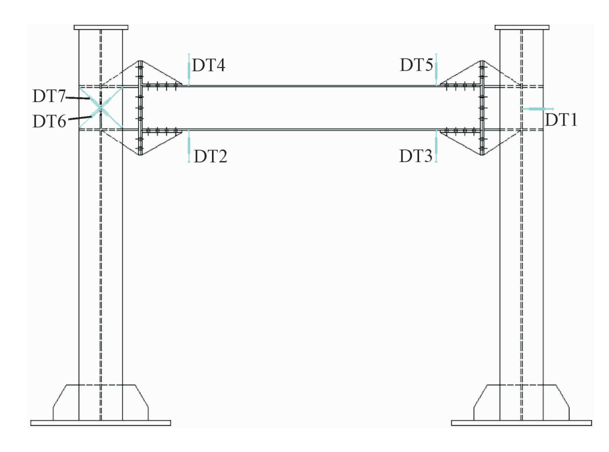


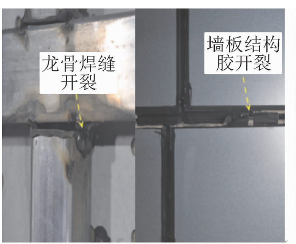
图 4　钢框架位移测点布置

Fig. 4　Layout of displacement measuring points of steel frame

2　试验现象

当荷载小于 200 kN 时,试件处于弹性阶段,无明显现象。当荷载达到 240 kN 时,荷载-位移曲线出现拐点表明结构进入屈服阶段,开始位移加载。

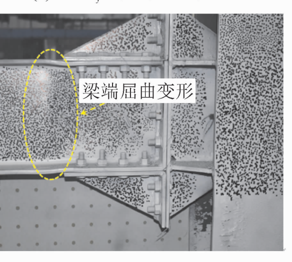
位移为 δ_y 时,试件无明显现象。位移加载至 1.5δ_y 时,试件发出响声,柱脚开始产生应力迹线,墙板向平面外轻微鼓曲。当位移向 2δ_y 加载时,竖向与水平龙骨焊缝逐渐开裂,柱脚应力迹线增加,且有少量漆皮脱落,墙板连接件脱离墙板卡槽(图 5a)。位移加载至 2.5δ_y 时,框架柱柱脚与节点产生屈曲变形,墙板填缝胶发生开裂(图 5b)。位移持续加载至 3δ_y 时,梁端开始发生屈曲变形,试件发出声音,焊缝轻微开裂。加载至 4.5δ_y 时,梁端腹板凹凸变形增加(图 5c),柱脚屈曲变形与焊缝开裂明显(图 5d)。此时,荷载下降至峰值荷载的 79.3%,超过 85%,视为试件丧失承载力,试验停止。



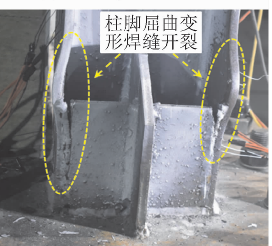
(a) δ=2δ_y, 龙骨与墙板开裂



(b) δ=2.5δ_y, 柱屈曲变形



(c) δ=4.5δ_y, 梁端屈曲变形



(d) δ=4.5δ_y, 柱脚焊缝开裂

图 5　试件破坏形态

Fig. 5　The local failure of specimen

3　试验结果及分析

3.1　滞回曲线

结构滞回曲线如图 6 所示,可知,在加载初期,结构属于力控制阶段,结构梁柱尚未屈服,处于弹性工作阶段,滞回曲线环体狭长,呈线性增长趋势。结构进入屈服阶段后,随着荷载的增加,滞回环逐渐打开,环体中心稍有捏缩,表明结构整体承载力与刚度较大。峰值荷载后,试件在梁端与柱脚形成结构塑性铰,滞回环体趋于饱满,环体包围面积达到最大,结构承载力逐渐下降。

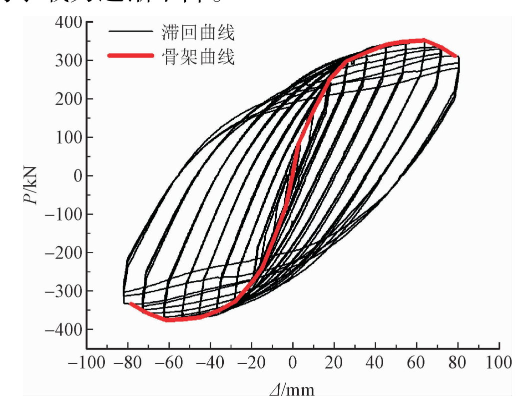


图 6　滞回曲线

Fig. 6　Hysteresis curve

3.2　骨架曲线

采用 EC3 规范推荐的 WEYNAND 等[22]方法计算本研究骨架曲线中屈服点。如图 7 所示,η 为初

始刚度修正系数,对于螺栓连接 η 取 2.0[23],$S_{j,ini}$ 为试件初始刚度。

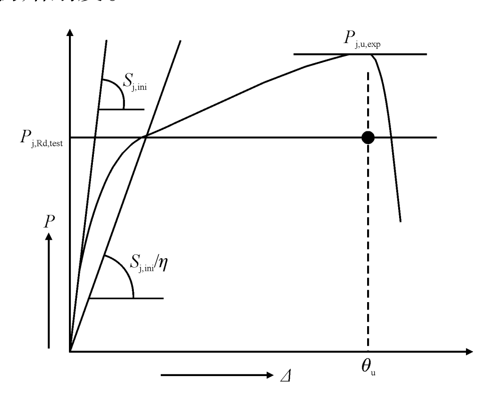


图7 WEYNAND 等计算屈服点方法

Fig.7 Calculated yield point method by WEYNAND et al.

试件骨架曲线见图8所示。根据上述计算方法确定出骨架曲线特征值列于表2。

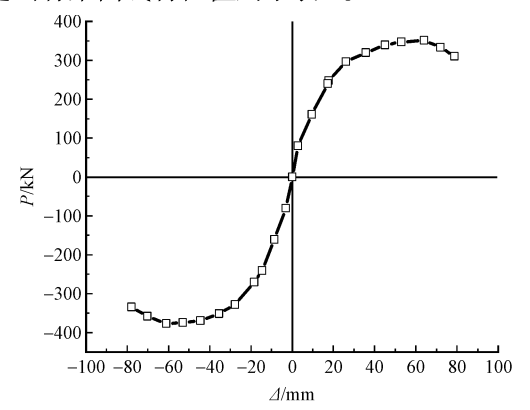


图8 试件骨架曲线

Fig.8 Skeleton curve

表2 试件骨架曲线特征值

Tab.2 Characteristic values of the skeleton curve of specimen

加载方向	屈服点			峰值点			破坏点			K_0/(kN·mm^{-1})
	P_y/kN	δ_y/mm	θ_y/%	P_m/kN	δ_m/mm	θ_m/%	P_u/kN	δ_u/mm	θ_u/%	
推	298.57	27.08	1.93	351.99	63.99	4.57	310.18	78.67	5.62	11.07
拉	280.61	19.78	1.41	377.43	61.12	4.37	334.13	78.00	5.57	14.03

注:K_0 为初始刚度。

由图8与表2可知,试件骨架曲线整体呈明显S形,整体变化趋势光滑,弹性阶段呈线性变化趋势,正向屈服承载力为 298.57 kN,负向屈服荷载为 280.61 kN,二者相差较小。此时,正负向屈服位移分别为 27.08 mm 和 19.778 mm,满足抗震设防要求。随着荷载的持续加载,结构进入强化阶段,骨架曲线呈上升状态。正负向峰值荷载分别为 63.99 kN 和 61.12 kN,峰值位移相差微小,分别为 4.57 kN 和 4.37 kN,表明结构在正向和负向的破坏点一致。此外,结构的正负向破坏荷载较为接近,屈服位移越大,结构延性越大,初始刚度越小。

3.3 刚度退化

刚度退化是结构动力特性的重要指标,用结构割线刚度 K_i 表征,即

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|\delta_i| + |-\delta_i|} \tag{1}$$

式中:F_i 为第 i 次峰值点荷载;δ_i 为与之对应的位移。

图9为结构的刚度退化曲线。由图可知,结构在弹性阶段时,刚度随荷载的增加,退化较为明显,这是由于墙板通过薄壁型钢龙骨外挂于钢框架上,墙板体系刚度与强度不足,受力后容易变形,且钢框架梁柱处于弹性阶段,使得结构整体刚度退化明显。屈服荷载后,刚度退化曲线的退化速率逐渐减小,曲线光滑平稳,表明结构延性较好,满足抗震设防要求。

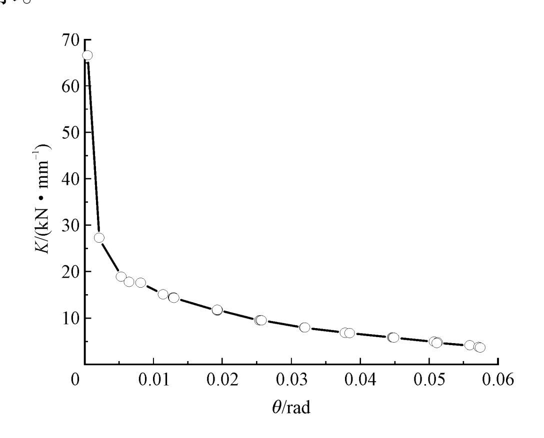


图9 刚度退化曲线

Fig.9 Stiffness degradation curve

3.4 耗能能力

耗能能力是评价结构抗震性能的重要指标,采用结构的等效黏滞阻尼比 h_e 表征,根据图10中滞回曲线 ABC 部分与横轴所围面积 A_1 与△BOD 的面积 A_2 进行计算[24],图中 F 为荷载,δ 为对应的位移。

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{A_{ABC}}{A_{\triangle BOD}} \tag{2}$$

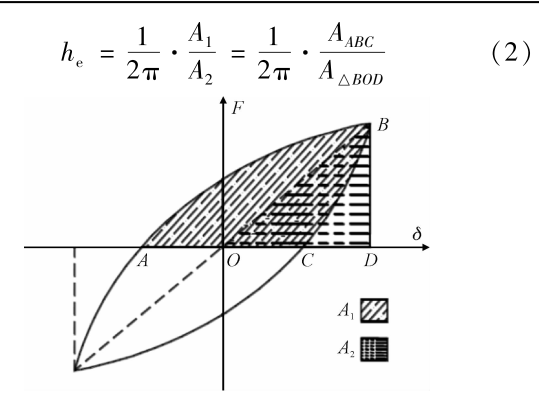


图 10　等效黏滞阻尼比计算示意

Fig. 10　Calculation diagram of equivalent viscous damping ratio

采用上述方法对结构等效阻尼比进行分析,曲线变化如图 11 所示。由图可知,结构的等效阻尼比在弹性阶段呈下降趋势,这是由于在弹性阶段外挂墙板体系较早发生屈服,参与耗能时间较短,且结构在加载前未进行预加载,开始加载后钢框架存在螺栓滑移,使得曲线出现下降段。试件进入屈服后,梁段与柱脚屈曲耗能,等效黏滞阻尼比逐渐增加,曲线不断上升,最大黏滞阻尼比达到 0.35,结构整体表现出较好的耗能能力。

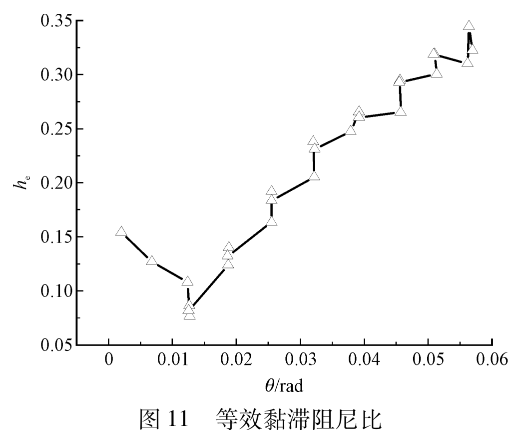


图 11　等效黏滞阻尼比

Fig. 11　Equivalent viscous damping ratio

4　结　论

1)外挂一体化保温装饰墙板与钢框架变形同步,破坏时墙板未发生脱落,整体破坏模式为框架梁端与柱脚发生屈曲变形,墙板龙骨变形,墙板间结构胶开裂。

2)外挂墙板弱轴钢框架结构滞回曲线饱满,滞回环包围面积较大,结构耗能能力优异。骨架曲线呈 S 型,最大正负向承载力分别为 351.99 kN 与 377.43 kN,屈服位移分别为 27.08 mm 与 19.78 mm,结构延性较好,满足抗震设防要求。

3)随荷载增加,试件弹性阶段刚度退化曲线下降明显,表明结构整体参与耗能,屈服阶段后,试件刚度退化逐渐趋于平稳,结构刚度未发生突变。

4)框架柱弱轴通过悬臂段与梁进行连接,解决了钢框架弱轴连接的强度不足,且采用顶底 L 型件连接节点,实现了梁段塑性铰外移,提升结构的耗能能力,最大阻尼比达到 0.35,满足“强柱弱梁”设计理念。

参考文献:

[1]　吴琨,贾俊明,车顺利.传统风格建筑结构材料演变及关键构件设计[J].建筑结构,2017,47(22):61-65.
WU Kun, JIA Junming, CHE Shunli. Structural material evolution and key component design of traditional style building[J]. Building structure, 2017, 47(22): 61-65(in Chinese).

[2]　王俊,赵基达,胡宗羽.我国建筑工业化发展现状与思考[J].土木工程学报,2016,49(5):1-8.
WANG Jun, ZHAO Jida, HU Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China[J]. China civil engineering journal, 2016, 49(5): 1-8(in Chinese).

[3]　刘康宁,张守健,苏义坤.装配式建筑管理领域研究综述[J].土木工程与管理学报,2018,35(6):163-170.
LIU Kangning, ZHANG Shoujian, SU Yikun. Review on management topics of prefabricated construction building[J]. Journal of civil engineering and management, 2018, 35(6): 163-170 (in Chinese).

[4]　侯兆新,刘晓刚.钢结构建筑产业化关键技术与示范[J].建筑钢结构进展,2021,23(10):1-11.
HOU Zhaoxin, LIU Xiaogang. Critical techniques and demonstration of steel structure building industrialization[J]. Progress in steel building structures, 2021, 23(10): 1-11(in Chinese).

[5]　HAMIDIA M, SHOKROLLAHI N, NASROLAHI M. Soil-structure interaction effects on the seismic collapse capacity of steel moment-resisting frame buildings[J]. Structures, 2021, 32: 1331-1345.

[6]　王修军.装配式梁柱外环板高强螺栓连接节点抗震性能研究[D].青岛:青岛理工大学,2020.

[7]　王乾,赵金城.钢框架柱栓焊混合拼接节点初始刚度计算及有限元分析[J].建筑结构,2020,50(15):118-125.
WANG Qian, ZHAO Jincheng. Calculation and finite element analysis of initial stiffness of steel frame column bolt-weld splice joint[J]. Building structure, 2020, 50(15): 118-125(in Chinese).

[8]　PAN Z H, SI Q, ZHOU Z B, et al. Experimental and numerical investigations of seismic performance of hybrid joints with bolted connections[J]. Journal of constructional steel research, 2017, 138: 867-876.

[9]　刘学春,浦双辉,徐阿新,等.模块化装配式多高层钢结构全螺栓连接节点静力及抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(12):43-51.
LIU Xuechun, PU Shuanghui, XU Axin, et al. Experimental study

on static and seismic performance of bolted joint in modularized multi-layer and high-rise prefabricated steel structures[J]. Journal of building structures,2015,36(12):43-51(in Chinese).

[10] 何明胜,刘礼,王京,等.新型全螺栓连接钢框架抗震性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2020,22(1):19-25.
HE Mingsheng,LIU Li,WANG Jing,et al. Experimental study on seismic behavior of new type fully-bolted connection for steel frame [J]. Progress in steel building structures,2020,22(1):19-25(in Chinese).

[11] WANG M,ZHANG C Y,SUN Y,et al. Seismic performance of steel frame with replaceable low yield point steel connection components and the effect of structural fuses[J]. Journal of building engineering,2022,47:103862.

[12] 李峰宇,郑晓燕,史誉州,等.钢柱弱轴外伸端板连接静力试验与钢框架抗震性能[J].建筑钢结构进展,2016,18(2):41-47.
LI Fengyu,ZHENG Xiaoyan,SHI Yuzhou,et al. Research on static tests of beam-to-column minor-axis extended end-plate connections and seismic behavior of steel frames[J]. Progress in steel building structures,2016,18(2):41-47(in Chinese).

[13] XU Y L,HAO J P. Seismic performance of spatial beam-column connections in steel frame[J]. Journal of constructional steel research,2021,180:106586.

[14] YIN L F,NIU Y,QUAN G,et al. Development of new types of bolted joints for cold-formed steel moment frame buildings[J]. Journal of building engineering,2022,50:104171.

[15] SUN L J,GUO H C,LIU Y H. Study on seismic behavior of steel frame with external hanging concrete walls containing recycled aggregates[J]. Construction and building materials,2017,157:790-808.

[16] SUN L J,GUO H C,LIU Y H. Experimental study on seismic behavior of steel frames with infilled recycled aggregate concrete shear walls[J]. Applied sciences,2019,9(21):4723.

[17] 郭宏超.半刚性框架-钢板剪力墙结构抗震性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.

[18] 王静峰,张荣,汪皖黔,等.轻钢龙骨注浆复合墙板-钢框架结构抗震性能数值分析与试验研究[J].建筑钢结构进展,2022,24(3):65-71.
WANG Jingfeng,ZHANG Rong,WANG Wanqian,et al. Numerical studies and tests on the seismic behavior of steel frames embedded with LSFG composite wall[J]. Progress in steel building structures,2022,24(3):65-71,(in Chinese).

[19] ZHOU B,SI Q,ZONG L,et al. Seismic performance analysis of steel frames with FCP composite external wall[J]. Structures,2022,39:86-97.

[20] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震试验规程:JGJ/T 101—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

[22] WEYNAND K. Sicherheits-und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur Anwendung nachgiebiger Anschlüsse im Stahlbau[M]. Aachen:Shaker Verlag,1997.

[23] European Commission. Eurocode 3:design of steel structures-part 1-8:design of joints:EN 1993-1-8:2005[S]. Ispra:European Commission,2005.

[24] 王燕,冯双,王玉田.钢框架刚性连接加强型节点滞回性能试验研究[J].土木工程学报,2011,44(5):57-68.
WANG Yan,FENG Shuang,WANG Yutian. Experimental study on hysteretic behavior for rigid-reinforced connections[J]. China civil engineering journal,2011,44(5):57-68(in Chinese).

(编辑 吕茵)